

МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ДИНАМИКЕ ФОНТАНИРОВАНИЯ РАСКАЛЕННЫХ БОМБ НА БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНАХ¹

Озеров А.Ю.²

Проведены специальные вулканолого-геофизические исследования, позволившие выявить периодичность в динамике фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах. Создан крупногабаритный газогидродинамический аппаратный комплекс моделирования базальтовых извержений. Проведенные на его основе эксперименты позволили предложить новую модель движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Самоорганизация одноразмерных газовых пузырьков, движущихся в расплаве по вертикальному каналу, при определенных расходах газа приводит к формированию открытых пузырьковых кластеров (кластерный режим), реализующихся в кратере в виде периодического фонтанирования раскаленных бомб.

Ключевые слова: вулкан, извержение, фонтанирование лавы, периодичности, лабораторное моделирование, двухфазные потоки, кластеры, механизм.

Special volcanologic-geophysical studies have been conducted to reveal a periodicity in the dynamics of fountaining of incandescent bombs at basaltic volcanoes. A large-size gas-hydrodynamic apparatus complex has been constructed to model basaltic eruptions. The experiments conducted with it allowed us to propose a new model of movement of magmatic melt in the conduit of a basaltic volcano. Self-organization of one-size gas bubbles, moving in the melt up the vertical channel, at certain discharge of gas leads to formation of open bubbly clusters (cluster regime), realized in the crater in the form of periodic fountaining of incandescent bombs.

Keywords: volcano, eruption, lava fountaining, periodicity, laboratory modeling, two-phase flows, clusters, mechanism.

Фонтанирование раскаленных бомб на базальтовых вулканах — грандиозное, часто встречающееся и опасное проявление вулканических сил нашей Планеты. Вулканические бомбы образуются из жидкой базальтовой магмы за счет лопающихся газовых пузырей, формирующихся в расплаве при подъеме к поверхности. Массовое выделение магматических пузырей из расплава в кратере вулкана приводит к фонтанированию раскаленных бомб. Светящиеся фонтаны в зависимости от характера вулкана и интенсивности

извержения поднимаются на высоту от 100 до 1000 м. При фонтанировании слабой интенсивности на поверхность Земли поступает 10–100 тонн/с вулканических бомб, при средней интенсивности 100–1000 тонн/с, а при сильной — свыше 1000 тонн/с. Этот тип вулканической активности представляет серьезную угрозу для населения и самолетов вследствие массового выпадения вулканических бомб и обильного выделения вулканического пепла, разносимого на сотни-тысячи километров от места извержения.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 97-05-64541, 00-05-64466, 03-05-64881, 06-05-64590, 09-05-00841).

² Озеров Алексей Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, e-mail: ozerov@ozerov.ru.





Рис. 1. Фонтан раскаленных вулканических бомб, вершинный кратер Ключевского вулкана (1984 г.). Диаметр кратера 750 м. Высота выброса бомб 200 м. Фотография Озерова А.Ю.

В 1984 г. при исследовании вершинного извержения Ключевского вулкана (рис. 1) нами была выявлена новая особенность в деятельности раскаленных фонтанов — устойчивая периодичность в динамике их развития. Наблюдалось необычное явление — последовательное чередование двух фаз извержения: интенсивного фонтанирования раскаленных бомб и слабого проявления вулканической деятельности. Во время фазы фонтанирования плотная струя раскаленных бомб выбрасывалась из кратера на высоту 100–500 м и вместе с бомбами извергалось большое количество вулканического пепла. Фонтанирование продолжалось 40–60 мин. Затем в динамике извержения происходило резкое ослабление фонтанирования, и за 10–15 мин вулкан переходил в фазу слабых и редких выбросов (высота выбросов — десятки метров). Интервал ослабления обычно длился 4–5 ч, затем в течение 10–15 мин извержение вновь вступало в фазу фонтанирования. Последовательное чередование этих двух фаз формировало устойчивый периодический эксплозивный режим со средним периодом 5–6 ч.

При обсуждении этого явления рассматривались материалы и по другим базальтовым вулканам, но оказалось, что описания периодического фонтанирования в литературе нет. Наши первоначальные попытки объяснить причину периодического фонтанирования на основе известных законов не увенчались успехом, так как ни в физике, ни в физиче-

ской вулканологии не описаны подобные процессы.

В связи с вышеизложенным были поставлены следующие задачи исследований: 1 — разработать методику исследования процессов периодического фонтанирования раскаленных бомб в динамике базальтовых извержений; 2 — детально охарактеризовать это явление; 3 — определить место режима периодического фонтанирования в ряду других режимов извержения; 4 — рассмотреть, существует ли этот режим при извержениях других вулканов мира; 5 — выявить механизм периодического фонтанирования.

ВУЛКАНОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач было проведено комплексное изучение на Ключевском вулкане (выбранном в качестве основного для исследования), которые показали, что изменения в динамике извержения наилучшим образом отражает вулканическое дрожание, которое непрерывно регистрируется на сейсмических станциях вблизи вулкана.

Специально для исследований периодических флуктуаций вулканического дрожания был разработан метод эквидистантного отсчета, который совместно с методами математической статистики и позволил детально изучить это явление [1, 2]. На примере извержения Ключевского вулкана 1984 г. была исследована огибающая вулканического дрожания, его спектральная характеристика и построены автокорреляционные функции для разных частей интервала проявления периодического процесса. Метод позволяет получать воспроизводимые результаты, не зависящие от внешних факторов: погоды, времени суток, условий наблюдения и др. В дальнейшем мы использовали эту методику или отдельные ее элементы на всех изученных нами извержениях Ключевского вулкана. В результате было установлено, что возникающий в динамике извержений режим периодического фонтанирования может реализовываться в широком диапазоне: минимальная длина периода — $T_{\min} \sim 1 \text{ ч } 30 \text{ мин}$, максимальная — $T_{\max} \sim 8 \text{ ч}$ [3]. Такой режим во время извержений может существовать от 1 до 10 суток, т.е. в питающей системе вулкана в какое-то время включается, а затем работает

мощнейший генератор природного периодического процесса.

Для определения места режима периодического фонтанирования в ряду других режимов Ключевского вулкана было проведено изучение длинных (недели — месяцы) рядов данных вулканического дрожания, зарегистрированного во время вершинных извержений 1984, 1993 и 2008 гг. Для всех трех извержений были получены близкие результаты.

Опишем их на примере извержения 1993 г., во время которого проводилось детальное изучение динамики извержения и исследовалось

вулканическое дрожание [4]. Экспедиционные исследования показали, что в июле 1993 г. происходило увеличение расхода магматического материала, поступающего на поверхность. Эту тенденцию можно видеть на графике изменения интенсивности вулканического дрожания (рис. 2а), когда уровень вулканического дрожания за 21 дней (02–23 июля) увеличился с 0,8 до 7,6 мкм/с (микрон в секунду). На фоне общего повышения интенсивности вулканического дрожания последовательно проявились три режима извержения: равномерный низкоинтенсивный (02–10 июля), периодиче-

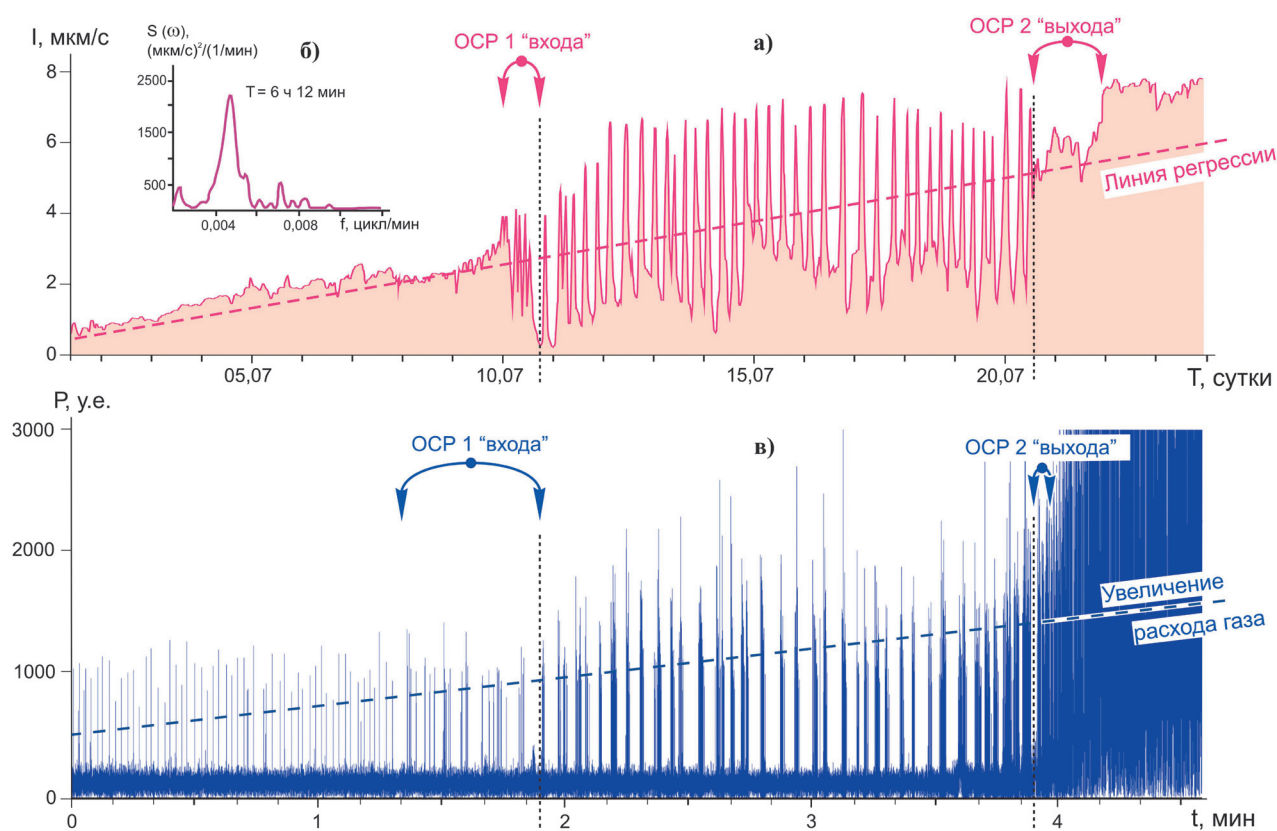


Рис. 2. Сопоставление характера эксплозивной активности Ключевского вулкана (1993 г.) с поверхностными проявлениями экспериментальных газогидродинамических режимов, полученных в экспериментах на КАМБИ

(а) — график интенсивности вулканического дрожания Ключевского вулкана для интервала времени 2 июня–24 июля 1993 г. [4]; по оси ординат — амплитуда интенсивности вулканического дрожания — I , мкм/с, по оси абсцисс — время — T , сутки; линия регрессии показана красной пунктирной линией. Регистрация вулканического дрожания выполнялась на сейсмической станции «Подкова»;

(б) — спектральная плотность мощности интенсивности вулканического дрожания для интервала времени 18 час 11 июля — 14 час 21 июля, показанного на графике рисунка (а) вертикальными пунктирными линиями; по оси ординат — спектральная плотность мощности интенсивности вулканического дрожания — $S(\omega)$, (мкм/с)²/(1/мин), по оси абсцисс — частота — f , цикл/мин;

(в) — график изменения давления звуковой волны, производимой лопающимися газовыми пузырьками над поверхностью модельной жидкости (по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ); по оси ординат — давление звуковой волны в условных единицах — P , у.е., по оси абсцисс — время — t , мин. Ось ординат по вертикали искусственно ограничено автором выше значения 3000 у.е.

ский (11–21 июля, 40 периодов за 10 суток при средней длине одного периода — 6 ч 12 мин, (рис. 26) и равномерный высокоинтенсивный (23–24 июля).

При этом установлены две области смены режимов (ОСР-1 «входа» и ОСР-2 «выхода»), когда эруптивная система приобретает новые качества. Смена режимов в обоих случаях происходила на фоне общего повышения уровня вулканического дрожания. В первом случае — ОСР-1 «входа» — эруптивная система входит в периодический режим, а во втором — ОСР-2 «выхода» — выходит из него, поэтому мы предлагаем рассматривать выделенные области смены режимов как принципиально разные. Описанные области ограничивают амплитудный интервал проявления периодического режима: нижняя граница ~ 3 мкм/с и верхняя $\sim 5,2$ мкм/с.

Рассмотрим совокупно кривую интенсивности вулканического дрожания и линию регрессии, показывающую тенденцию увеличения уровня вулканического дрожания (рис. 2а). Переход системы из равномерного режима в периодический и вновь в равномерный, при постоянном тренде повышения уровня дрожания, позволяет полагать, что в магматической системе с 11 по 21 июля проявился процесс нелинейного возбуждения колебаний, выражающийся в глубоких периодических флуктуациях. Их спектральная характеристика представлена на рис. 2б.

Такое же последовательное проявление трех вышеописанных режимом и двух областей смены режима (ОСР-1 «входа» и ОСР-2 «выхода») установлено при исследовании извержений Ключевского вулкана 1984 и 2008 гг.

Приведенные материалы свидетельствуют, что процесс периодического фонтанирования на Ключевском вулкане представляет собой не эпизодическое событие, а является составляющей более крупной эруптивной закономерности и реализуется между двумя режимами: равномерным низкоинтенсивным и равномерным высокоинтенсивным.

Кроме исследований на Ключевском вулкане, мы провели поиски свидетельств периодического фонтанирования раскаленных бомб на других базальтовых вулканах. Как уже отмечалось, описаний периодического фонтанирования в литературе нет. В связи с этим был выполнен анализ опубликованных записей сейсмограмм, позволивший установить, что пе-

риодическое фонтанирование характерно для ряда вулканов мира: Каркар и Маннам (Папуа Новая Гвинея), Килауэа (Гавайи), Нирагонго (Конго, Африка), НВ Рота-1 (Марианская впадина), Толбачинский (Камчатка) и Этна (Италия) [5–9].

Из всего вышеизложенного следует, что периодическое фонтанирование раскаленных бомб — широко распространенное явление при извержениях базальтовых вулканов. Но механизм его один из самых слабоизученных в вулканологии. Попытки привлечь известные газожидкостные режимы в вертикальных каналах: пузырьковый, снарядный, кольцевой и дисперсный — не дали однозначного объяснения причин этого явления. Поэтому для изучения этого феномена нами с 2003 г. проводились лабораторные эксперименты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей экспериментов являлось выявление причин возникновения периодичностей в динамике фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах. Для этого проводилось лабораторное моделирование поведения двухфазных газожидкостных смесей в вертикальных колоннах. Объектом исследования являлись газовые пузырьки и их групповое движение при всплывании (барботировании) сквозь модельные жидкости разной плотности, с последующим сопоставлением полученных данных с реальными вулканическими событиями. Специально для этих исследований был сконструирован комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений — КАМБИ «барботажная колонна» [10, 11].

Комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений

При создании лабораторной установки мы стремились максимально учесть соотношения параметров реальных питающих магматических систем. За основу принят Ключевской вулкан — типичный представитель базальтовых вулканов. КАМБИ состоит из двух систем: моделирующей и регистрирующей (рис. 3).

Моделирующая система представляет собой прозрачную, вертикально расположенную пластиковую колонну высотой 16 600 мм, внутренний диаметр 18 мм. Нижний торец колон-

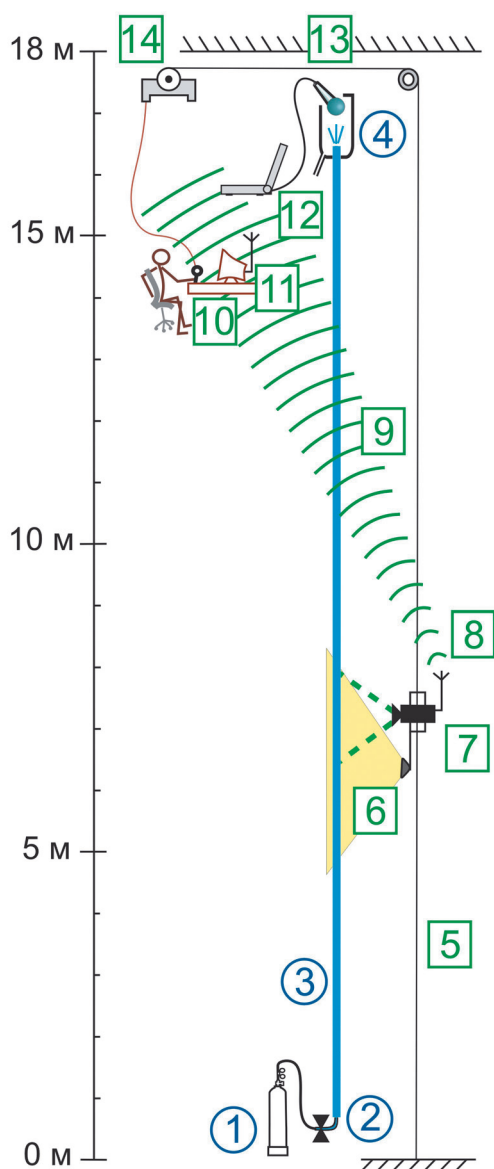


Рис. 3. Схема комплекса аппаратуры моделирования базальтовых извержений — КАМБИ «барботажная колонна»

1–4 — моделирующая система (синие кружки), 5–14 — регистрирующая система (зеленые квадраты): 1 — газовый баллон высокого давления с воздухом; 2 — кран высокоточной регулировки подачи газа; 3 — прозрачная колонна; 4 — аквариум для приема жидкости; 5 — трос, направляющий движение платформы динамического видеослежения; 6 — источник света; 7 — видеокамера (зеленым штрих-пунктиром показан угол захвата при съемке); 8 — передатчик и телеметрическая антенна; 9 — радиосигнал; 10 — пульт управления, отвечающий за перемещение видеокамеры; 11 — приемник видеосигнала и монитор; 12 — компьютер; 13 — микрофон; 14 — электродвигатель. В верхней части рисунка — оператор, управляющий движением видеокамеры.

ны герметизирован пробкой, сквозь которую в колонну введена полая игла, через которую в модельную жидкость подается газ. Верхняя часть колонны открыта и входит в аквариум, созданный для приема поступающей модельной жидкости. Пластиковая колонна имитирует питающий канал вулкана, а аквариум — кратер вулкана.

В качестве модельной жидкости применялся 35 % раствор глицерина в воде; это соотношение было подобрано в результате предварительных экспериментов. В качестве барботирующего газа использовался обычный воздух, поступающий под давлением из газового баллона. Основной массив экспериментов был проведен с пузырьками одного размера при отношении диаметра пузырька к внутреннему диаметру колонны примерно 1:20, что исключало возможность запираания внутреннего сечения колонны крупным пузырьком. Были проведены опыты также с более крупными и более мелкими пузырьками.

Регистрирующая система (рис. 3) включает блок динамического видеослежения, позволяющий следить за любым пузырьком в колонне и в соответствии со скоростью регистрируемого пузырька или группы пузырьков изменять скорость движения мобильной тележки с видеокамерой, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации (экспериментальный аналог сейсмической станции на вулкане), электронный высотомер и спидометр, синхронизирующее устройство и отключающую систему.

Аналогов КАМБИ в мире нет.

Экспериментальные исследования и их обсуждение

Во время экспериментов в нижнюю часть вертикальной колонны, заполненной модельной жидкостью, вводились газовые пузырьки, которые всплывали (барботировали) сквозь модельную жидкость (рис. 4). Количество газовых пузырьков, поступающих в колонну, регулировалось при помощи высокоточного газового редуктора. Газовые структуры, формирующиеся в процессе подъема пузырьков, постоянно фиксировались при помощи перемещающейся видеокамеры, движущейся вдоль прозрачной колонны. Звуковые волны, производимые лопающимися на поверхности модельной жидкости газовыми пузырьками, регистрировались по измерению давления при

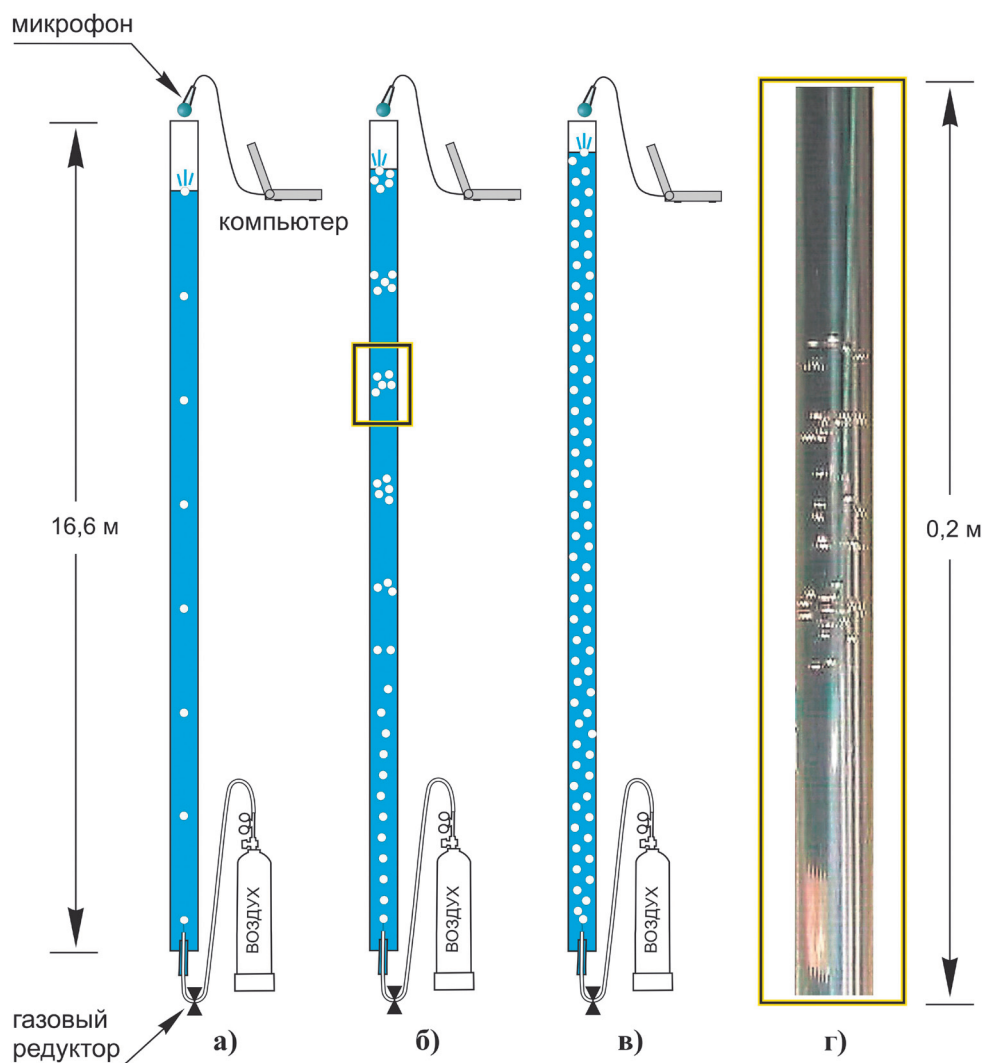


Рис. 4. Схематичное изображение газогидродинамических режимов при увеличении расхода газа

- (а) — пузырьковый низкодбитный режим;
- (б) — пузырьковый среднедбитный в нижней части колонны, переходящий в кластерный в средней части колонны (прямоугольником ограничен участок колонны с пузырьковым кластером, рис. г);
- (в) — пузырьковый высокодбитный;
- (г) — фотография открытого пузырькового кластера, состоящего из 40 пузырьков

помощи микрофона, расположенного над верхней частью экспериментальной колонны.

На рисунках 4а, б, в показано схематичное изображение трех последовательных этапов одного и того же эксперимента, во время которого плавно увеличивалось количество газовых пузырьков, поступающих в колонну. На рис. 2в приведен график изменения давления звуковой волны, производимой лопающимися газовыми пузырьками на поверхности модельной жидкости. Каждый вертикальный импульс на графике соответствует всплеску одного лопающегося пузырька.

В экспериментах рассматривалось влияние расхода газа на характер газожидкостных структур. При низких расходах газа (пузырьки подавались через 10 см) наблюдался равномерный, пузырьковый низкодбитный режим по всей лабораторной колонне (рис. 4а). Он выражен на графике изменения давления звуковой волны в интервале 0 мин 00 с — 1 мин 20 с в виде равномерно распределенных акустических импульсов от лопающихся на поверхности газовых пузырьков (рис. 2в). При средних расходах газа (пузырьки подавались через 1 см) в нижней части колонны на-

блюдался равномерный, среднедебитный пузырьковый режим, который в средней части колонны переходил в периодический режим открытых пузырьковых кластеров (рис. 4б); достигнув поверхности, кластеры фиксировались в виде периодически повторяющихся плотных групп акустических импульсов (см. рис. 2в, интервал 1 мин 54 с — 3 мин 53 с). При высоких расходах газа (пузырьки подавались через 0,3 см) по всей высоте барботажной колонны наблюдался равномерный высокодебитный пузырьковый режим (рис. 4в), который проявлялся на поверхности в виде равномерной последовательности сближенных акустических импульсов (рис. 2в, интервал 3 мин 58 с — 4 мин 44 с).

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что при монотонном увеличении расхода газа в эксперименте дважды происходила коренная перестройка структуры газожидкостного потока в двух областях смены режима (ОСР): при переходе от пузырькового низкодебитного режима к кластерному периодическому режиму — ОСР-1 «входа» — и от кластерного периодического режима к пузырьковому высокодебитному — ОСР-2 «выхода».

Это дает основание считать, что в барботирующей системе между двумя областями: ОСР-1 и ОСР-2, в интервале 1 мин 54 с — 3 мин 53 с (ограниченном на рис. 2в вертикальными пунктирными линиями) проявился нелинейный физический процесс, выраженный в периодическом формировании открытых пузырьковых кластеров.

В процессе экспериментальных исследований выявлена новая, ранее неизвестная, морфологически устойчивая газогидродинамическая структура — открытый пузырьковый кластер (рис. 4г). Он представляет собой объем жидкости с высокой концентрацией пузырьков, сверху и снизу ограниченный жидкостью, не содержащей газовых пузырьков. Совокупность открытых пузырьковых кластеров, следующих друг за другом на фиксированном расстоянии, образует периодический режим открытых кластеров (рис. 4б — верхняя часть колонны).

Изучено поведение газовых пузырьков в экспериментальной колонне, установлено десять видов движения пузырьков в модельной жидкости (см. [11]). Приведем те из них, которые ответственны за формирование кластерного режима:

— движение догоняющее (за лидером). Между одноразмерными пузырьками существует расстояние взаимодействия ($L_{\text{взаим}}$), которое определяет возможность пузырьков догонять друг друга. Если расстояние между пузырьками больше $L_{\text{взаим}}$, то пузырьки пройдут весь путь «в одиночку», так как после прохождения пузырька среда успевает восстановиться, и поднимающийся снизу пузырек не может догнать верхний. Если это расстояние меньше $L_{\text{взаим}}$, тогда в силу вступает «догоняющее» движение, нижний пузырек становится в спутный след и обязательно догонит верхний.

— движение горизонтальных пузырьковых структур. Два одноразмерных пузырька, догнав друг друга, продолжают свой путь вместе, сформировав дупузырьковый кластер. При этом они стремятся занять горизонтальное положение в колонне и образуют горизонтальный слой поперек своего основного, вертикального движения в жидкости.

— кластерообразующее движение. Вышеописанное горизонтальное положение пузырьков сокращает сечение обратного тока жидкости, скорость газовой структуры уменьшается и создается динамическая газовая пробка, движущаяся медленнее, чем одиночный пузырек. Нижние пузырьки догоняют вышеидущий кластер, «улавливаются» им и становятся его частью. Начинается лавинообразный процесс объединения пузырьков — кластерообразование.

— последовательное движение кластеров (кластерный режим). Продолжающийся подниматься снизу поток пузырьков попадает в те же условия, в которых происходило вышеописанное кластерообразование, и на тех же уровнях высоты происходят сходные процессы объединения пузырьков. Таким образом, формирующиеся газовые структуры последовательно проходят одну и ту же морфологическую эволюцию. Эти циклы периодически повторяются, и в барботажной колонне одновременно наблюдаются десятки кластеров, состоящих из равновеликих пузырьков.

— сквозное движение разноразмерных пузырьков через кластер. С учетом того, что в реальных питающих системах вулканов находятся пузырьки разных размеров, мы провели специальные исследования с тремя размерами пузырьков. Одиночные крупные пузырьки и кластеры, состоящие из крупных пузырьков, проходят сквозь кластеры, состоящие из среднеразмерных пузырьков. Одиночные мелкие

пузырьки и кластеры, состоящие из мелких пузырьков, не препятствуют прохождению среднеразмерных пузырьков или кластеров и не захватываются последними. Пузырьки разных размеров фактически «не чувствуют» друг друга, не объединяются в открытые пузырьковые кластеры, поэтому в кластере остаются пузырьки только одного размера.

Возникновение кластерного режима приводит к существенному перераспределению пузырьков в барботажной колонне, которое на поверхности жидкости приводит к интенсивному разбрызгиванию жидкости за счет лопающихся пузырьков кластера. В промежутках между поступлением кластеров поверхность жидкости остается в спокойном состоянии. Таким образом, реализуется устойчивое периодическое фонтанирование модельной жидкости.

Теперь проведем сравнение результатов изучения вулканического дрожания при извержении Ключевского вулкана 1993 г. (рис. 2а) с данными акустических исследований на КАМБИ (по измерению звуковых волн, производимых лопающимися газовыми пузырьками на поверхности модельной жидкости) (рис. 2в). Сопоставление природного и экспериментального графиков демонстрирует большое их сходство в последовательной реализации трех режимов в паре природный процесс — эксперимент соответственно: 1 — равномерный низкоинтенсивный — равномерный низкодебитный, 2 — периодический в обоих процессах, 3 — равномерный высокоинтенсивный — равномерный высокодебитный. При этом установлены две области смены режимов — как при извержениях вулкана, так и в экспериментальных исследованиях: ОСР-1 «входа» в периодический режим и ОСР-2 «выхода» из него. Кроме того, на обоих графиках хорошо выражены процессы нелинейного (в нашем случае периодического) возбуждения вулканической и экспериментальной систем.

Полученные данные подтвердили правомерность приложения результатов экспериментальных исследований на КАМБИ применительно к механизму процессов, происходящих в подводящем канале Ключевского вулкана. Результаты экспериментального моделирования позволяют полагать, что во время извержений на вулкане реализуется аналогичный процесс, когда из жидкой магмы в кратере за счет лопающихся газовых пузырьков происходит фонтанирование лавы, и вылетают пластичные базальтовые бомбы.

Реализация на поверхности различных режимов течения двухфазного магматического расплава ответственна за многообразие эксплозивных явлений в кратере вулкана. В зависимости от типа газогидродинамического режима в питающей системе базальтовых вулканов в кратере могут проявляться различные типы эксплозивной деятельности: 1 — при равномерном низкодебитном режиме магматического потока — равномерная пепловая эмиссия с небольшим количеством вулканических бомб, 2 — при периодическом режиме открытых пузырьковых кластеров, закономерно возникающем при среднедебитном расходе магматического вещества, — энергичное периодическое фонтанирование раскаленных бомб, 3 — при равномерном высокодебитном режиме магматического потока — продолжительное монотонное интенсивное фонтанирование раскаленных бомб.

Периодическое фонтанирование раскаленных бомб было впервые выделено при исследовании извержений Ключевского вулкана (1984 г.), в последующем оно многократно фиксировалось в динамике его эруптивной деятельности. На вулкане была детально изучена структура периодического фонтанирования, и благодаря экспериментальному физическому моделированию определен механизм его генерации. Анализ опубликованных записей сейсмограмм на других вулканах мира позволил установить, что периодическое фонтанирование характерно для многих базальтовых вулканов. На основании вышеизложенного правомерно выделить этот тип извержения в качестве самостоятельного. Мы предлагаем назвать его Ключевской и использовать этого термин, наряду с уже известными типами — Вулканский, Гавайский, Пелейский, Плинианский и Стромболианский.

Ключевской тип вулканической деятельности можно охарактеризовать следующим образом: это процесс периодического или квазипериодического фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых вулканах. Он характеризуется чередованием эпизодов интенсивного фонтанирования и эпизодов ослабления или прекращения деятельности огненных фонтанов. Раскаленные вулканические бомбы в виде веера или вертикальной струи выбрасываются на высоту, которая в зависимости от интенсивности извержения обычно находится в интервале 100–500 м, иногда достигает 1 км.

Периодическое фонтанирование возникает на фоне общего повышения интенсивности извержения между двумя режимами — равномерным низкоинтенсивным и равномерным высокоинтенсивным. Огненные фонтаны могут сопровождаться одновременным излиянием лавовых потоков. Периодическое фонтанирование проявляется в ходе вершинных, побочных и латеральных извержений. Оно наблюдается при наземных и подводных извержениях. Механизм извержений Ключев-

ского типа определяется газогидродинамическими процессами движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Самоорганизация одноразмерных газовых пузырьков, движущихся в магме по вертикальному каналу, при определенных расходах газа приводит к формированию открытых пузырьковых кластеров (кластерный режим), последовательно поднимающихся вверх и реализующихся в кратере в виде периодического фонтанирования раскаленных бомб.

Литература

1. Ozerov A.Yu., Konov A.S. Regularities the dynamics of the Klyuchevskoy volcano eruption // Proceeding Kagoshima International Conference of Volcanoes. Japan. — 1988. — P. 63–65.
2. Конов А.С., Озеров А.Ю. Закономерности в динамике извержений Ключевского вулкана и сопровождающем их вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. — 1988. — № 3. — С. 21–38.
3. Озеров А.Ю. Периодичности в динамике извержений вулканов Камчатки // в сборнике «Современный вулканизм и связанные с ним процессы», Материалы юбилейной сессии Камчатского научного центра ДВО РАН, посвященной 40-летию Института вулканологии (8–11 октября 2002 г.). Петропавловск-Камчатский. — 2003. — С. — 26–28.
4. Ozerov A.Yu., Firstov P.P., Gavrilov V.A. Periodicities in the dynamics of eruptions of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series. — 2007. — V. 172. — P. 283–291.
5. Barker S.R., Sherrod D.R., Lisowski M., Heliker C., Nakata J.S. Correlation Between Lava-Pond Drainback, Seismicity, and Ground Deformation at Pu'u 'Ö'ö // The Pu'u 'Ö'ö-Küpaianaha Eruption of Kilauea Volcano, Hawai'i: The First 20 Years. U.S. Geological Survey Professional Paper 1676. Reston, Virginia. — 2003. — P. 53–62.
6. Chadwick W.W., Cashman K.V., Embley R.W., Matsumoto H., Dziak R.P., de Ronde C.E.J., Lau T. K., Deardorff N.D., Merle S.G. Direct video and hydrophone observations of submarine explosive eruptions at NW Rota-1 volcano, Mariana arc // J. Geophys. Res. — 2008. — V. 113. — B08S10. — P. 1–23.
7. McNutt S.R. Volcanic Tremor // Encyclopedia of Earth System Science. Academic Press. San Diego, California. — 1992. — P. 417–425.
8. McNutt S.R. Volcano Seismology and Monitoring for Eruptions, Chapter 25 // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. — 2002. — Vol. 81A. — IASPEI. — P. 383–406.
9. Privitera E., Sgroi T., Gresta S. Statistical analysis of intermittent volcanic tremor associated with the September 1989 summit explosive eruptions at Mount Etna, Sicily // J. Volcanol. Geotherm. Res. — 2003. — V. 120. — P. 235–247.
10. Ozerov A.Yu. Experimental Modeling of the Explosion Mechanism of Basaltic Magmas // Petrology. — 2009. — Vol. 17, No. 7. — P. 653–668.
11. Озеров А.Ю. Механизм периодического фонтанирования базальтовых вулканов (по экспериментальным исследованиям и природным наблюдениям) // Сборник «Экстремальные природные явления и катастрофы», посвященный 80-тилетию академика РАН Н.П. Лаврова. — Том. 2. — М.: 2011. — С. 279–298.